

PERANCANGAN PLTMH SUNGAI YEH HA DI KARANGASEM DENGAN TURBIN CROSSFLOW

D. A. Virgunia¹, I W. Sukerayasa², W. G. Ariastina², I N. Setiawan², I. A. D. Giriantari², I N. Satya Kumara²

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

²Dosen Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana
Kampus Bukit, Jl Raya Kampus Unud Jimbaran, Kuta Selatan, Badung, Bali 80631
anjanivirgunia@gmail.com

ABSTRAK

Kayuan Yeh Ha merupakan sungai yang digunakan sebagai tempat pemandian di Desa Ababi, Kabupaten Karangasem yang bersumber dari sungai Yeh Ha. Sungai Yeh Ha memiliki potensi sumber energi baru terbarukan yang mampu dimanfaatkan sumber airnya untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro. Pengukuran debit air dilakukan selama seminggu pada salah satu saluran sumber sungai Yeh Ha pada musim kemarau. Hasilnya menunjukkan rata-rata debit air sebesar 0,201 m³/s. Data debit air yang digunakan merupakan potensi energi minimal yang dapat diserap. Berdasarkan data debit air terukur dan *head* yang digunakan 4,6 m, menggunakan Tanaka Suiryoku *Turbine Selection Chart* didapatkan bahwa turbin *crossflow* memenuhi kriteria pemilihan turbin. Hasil analisis dan perhitungan yang dilakukan, daya yang tersedia pada turbin diperoleh 8 kW dengan efisiensi 80%. Menyesuaikan dengan kapasitas turbin, generator sinkron 3 fasa dengan rotor permanen dipilih berdasarkan perbandingan jenis, spesifikasi, dan karakteristik generator. Daya *output* yang dihasilkan generator adalah 6 kW dengan kecepatan putaran 1500 rpm dan efisiensi generator 90%.

Kata Kunci: PLTMH, Debit, *Crossflow*, Daya, Generator, Sungai Yeh Ha

ABSTRACT

Yeh Ha River in Ababi Village, Karangasem Regency, Bali, is a river that originates from the Yeh Ha springs and is used as a bathing place. This river has the potential for a new renewable energy source that can be utilized for the Micro Hydro Power Plant (MHPP). Discharge measurements were carried out for a week on one of the Yeh Ha spring source channels during the dry season. The results showed an average discharge of 0.201 m³/s. The discharge data used is the minimum potential energy that can be absorbed. Based on the measured discharge data and the used head of 4.6 m, the Tanaka Suiryoku Turbine Selection Chart shows that the crossflow turbine meets the turbine selection criteria. The results of the analysis and calculations show that the available power at the turbine is 8 kW with an efficiency of 80%. A 3-phase synchronous generator with a permanent magnet rotor was selected based on a comparison of the types, specifications, and characteristics of the generator to match the turbine capacity. The output power generated by the generator is 6 kW with a rotational speed of 1500 rpm and a generator efficiency of 90%.

Key Words: MHPP, Discharge, *Crossflow*, Electrical Power, Yeh Ha River

1. PENDAHULUAN

Di tengah meningkatnya kebutuhan akan energi yang bersih dan terbarukan, Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) muncul sebagai solusi yang menjanjikan, khususnya di wilayah dengan sumber daya air yang melimpah. Dalam konteks ini, penelitian bertujuan untuk merancang sebuah sistem PLTMH yang efisien dan ramah lingkungan di Desa Ababi,

Karangasem, Bali, dengan memanfaatkan potensi sumber sungai Kayuan Yeh Ha.

Potensi sumber sungai Kayuan Yeh Ha yang selalu mengalir sepanjang tahun memberikan manfaat yang dapat digunakan untuk sistem PLTMH. Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) ini akan meningkatkan pemanfaatan Energi Baru Terbarukan (EBT) di Bali khususnya di Desa Ababi, Karangasem. Pemanfaatan sumber EBT

tertulis dalam Peraturan Gubernur Bali Nomor 45 Tahun 2019 tentang Bali Energi Bersih [1]. Pemerintah Provinsi Bali menargetkan penambahan listrik yang bersumber dari EBT sebesar 238,8 MW sehingga bauran energi baru terbarukan mampu mencapai 13,49%. Bali memiliki potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro sebesar 24,5 MW dan pemanfaatannya sendiri hanya 0,1 % dari potensi yang ada [2].

Energi hidro memanfaatkan gerakan air yang mengalir akibat gaya gravitasi. Gaya gravitasi bekerja pada substansi hampir 1000 kali lebih berat dari udara, menjamin bahwa aliran air yang lambat sekalipun dapat menghasilkan energi yang signifikan.

Turbin air dirancang untuk mengoptimalkan penggunaan potensi energi ini, menggantikan metode penggerak tradisional dengan solusi yang lebih efisien dan berkelanjutan. Turbin air, sebagai alat pengubah energi potensial air menjadi energi kinetis, dengan pemilihan jenis turbin yang tepat menjadi kunci untuk memaksimalkan efisiensi dan *output* energi.

2. TEORI

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)

Pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH) adalah suatu pembangkit listrik berskala kecil yang menggunakan tenaga air sebagai penggerakannya, misalnya saluran irigasi, sungai atau air terjun alam dengan cara memanfaatkan tinggi terjunnya air (*head*) dan jumlah debit air maupun tekanan airnya. Pada prinsipnya, energi listrik yang dihasilkan oleh PLTMH bergantung dari jumlah debit dan *head* yang ada pada sumber air. Jadi semakin besar debit dan *head* yang terukur maka energi listrik yang dihasilkan juga semakin besar [3].

Semakin tinggi ketinggian jatuh air, semakin besar tekanan hidrostatik yang dapat diubah menjadi energi listrik, seperti yang dijelaskan dalam persamaan (1) [4].

$$P = \rho \times g \times h \quad (1)$$

Keterangan:

P = Tekanan hidrostatik

ρ = Massa jenis air (1.000 kg/m³)

g = Percepatan gravitasi (9,8 m/s²)

h = Tinggi jatuh air (*head*)

2.2 Metode Pengukuran Menggunakan *Current Meter*

Pengukuran dengan alat *current meter* dapat dilakukan di beberapa titik dalam suatu penampang aliran. Mengingat bahwa kondisi kecepatan aliran air di suatu penampang secara vertikal tidak merata, sehingga pengukuran dapat dilakukan dengan beberapa cara sebagai berikut [5]:

- 1) Pada umumnya pengukuran di satu titik dilakukan jika kedalaman aliran airnya ≤ 1 meter. Dimana alat *current meter* diletakkan pada kedalaman 0,6h diukur dari atas permukaan air.
- 2) Pengukuran yang dilakukan di beberapa titik maka kedalaman yang dapat dipakai adalah 0,2h dan 0,8h diukur dari atas permukaan air. Kemudian menjumlahkan kedua data tersebut dan bagi dua dan didapatkan nilai kecepatan rata-ratanya.
- 3) Untuk pengukuran di tiga titik maka dapat dilakukan pada kedalaman 0,2h, 0,6h, dan 0,8h. Lalu untuk rata-ratanya dapat dengan menjumlahkan ketiga nilai kedalaman tersebut dan bagi tiga.

Untuk menghitung nilai debit air dapat menggunakan persamaan (2) [4]:

$$Q = V \times A \quad (2)$$

Dimana V adalah kecepatan aliran air dalam m/s dan A adalah luas penampang air dalam m².

2.3 Perhitungan Pipa *Penstock*

Perhitungan pipa *penstock*/pesat dalam perancangan PLTMH meliputi analisis teliti terhadap perhitungan ukuran dan spesifikasi dari pipa yang digunakan untuk mengalirkan air dari sumber sungai ke turbin hidro.

a. Diameter pipa pesat

Diameter pipa pesat dapat dicari menggunakan persamaan (3) [6]:

$$d = 0,72 \times Q^{0,5} \quad (3)$$

Keterangan:

d = Diameter pipa pesat (m)

Q = Debit (m³/s)

b. Kecepatan aliran air

Kecepatan aliran air pipa pesat dapat dihitung menggunakan persamaan (4) [6]:

$$v = \frac{4 \times Q}{\pi \times d^2} \quad (4)$$

Keterangan:

v = Kecepatan aliran air pipa (m/s)
 Q = Debit air (m³/s)
 d = Diameter pipa pesat

c. Rugi-rugi pipa pesat

Rugi-rugi dalam pipa pesat adalah penurunan energi hidrolis yang terjadi selama aliran air melalui pipa tersebut [6]:

• Rugi gesekan pada dinding pipa

Rugi ini disebabkan oleh gesekan antara fluida dan dinding pipa. Rugi gesekan pada dinding pipa dapat menggunakan persamaan (5) [6].

$$h_{wall\ loss} = \frac{f \times L_{pipe} \times 0,08 \times Q^2}{d^5} \quad (5)$$

Keterangan:

f = Konstanta friksi (Diagram Moody)
 L_{pipe} = Panjang pipa pesat (m)
 Q = Debit air (m³/s)
 d = Diameter pipa pesat (m)

• Rugi turbulensi pada pipa

Rugi turbulensi disebabkan oleh aliran fluida yang turbulen, yaitu aliran yang tidak teratur dan berputar-putar. Rugi turbulensi pada pipa pesat dapat dihitung menggunakan persamaan (6) [6].

$$h_{turb\ loss} = \frac{v^2}{2 \times g} (K_{friksi}) \quad (6)$$

Keterangan:

h_{turb loss} = Rugi turbulensi pada pipa pesat (m)
 v = Kecepatan aliran pipa pesat (m/s)
 g = Percepatan gravitasi (9,8 m²/s)
 K_{friksi} = Konstanta friksi

• Rugi friksi pada pipa

Rugi friksi pada pipa pesat adalah penurunan energi yang terjadi akibat gesekan antara fluida (air) dan dinding pipa. Perhitungan rugi friksi dapat menggunakan persamaan (7) [6].

$$h_{friction} = h_{wall\ loss} + h_{turb\ loss} \quad (7)$$

Keterangan:

h_{friction} = Rugi friksi (m)
 h_{wall loss} = Rugi gesekan pipa pesat (m)
 h_{turb loss} = Rugi turbulensi pipa pesat (m)

d. Head efektif

Perhitungan untuk head efektif dapat menggunakan persamaan (8) [6].

$$h_{Net} = h_{gross} - h_{friction} \quad (8)$$

h_{friction} = Rugi friksi (m)

h_{gross} = Head kotor (m)

Persentase kehilangan head ditentukan dengan:

$$\%Losses = \frac{h_{friction}}{h_{gross}} \times 100\% \quad (9)$$

e. Surge pressure

Menentukan surge pressure dapat menggunakan persamaan (10) dan (11) [6].

$$a = \frac{1400}{\sqrt{1 + \left(\frac{2,1 \times 10^9 \times d}{E \times t}\right)}} \quad (10)$$

Keterangan:

d = Diameter pipa pesat (m)
 t = Ketebalan dinding pipa pesat (m)
 E = Modulus young's elastisitas (N/m²)

$$h_{surge} = \frac{a \times v}{g} \quad (11)$$

Keterangan:

v = Kecepatan aliran air dalam pipa pesat (m/s)
 a = Kecepatan rambat gelombang (m)

f. Menghitung rugi-rugi total pipa

Rugi-rugi total pipa dapat dihitung menggunakan persamaan (12) [6].

$$h_{total} = h_{gross} + h_{surge} \quad (12)$$

g. Menentukan safety factor

Safety factor dapat dihitung menggunakan persamaan (13) [6].

$$SF = \frac{t \times s}{5 \times h_{total} \times 10^3 \times d} \quad (13)$$

Keterangan:

t = tebal Penstock (m)
 s = kekuatan bahan (N/m²)
 d = diameter Penstock (m)
 h_{total} = rugi-rugi total Penstock (m)

2.4 Spesifikasi Turbin

Perhitungan spesifikasi turbin melibatkan pemilihan turbin yang sesuai dengan karakteristik aliran air di lokasi penelitian. Hal ini meliputi kecepatan aliran air, tinggi jatuh air, serta kapasitas debit air yang dapat diolah oleh turbin [7]:

a. Daya keluaran turbin

Menghitung daya output turbin dapat menggunakan persamaan (14) [7].

$$P_t = \rho \times g \times Q \times h_{Net} \times \eta \quad (14)$$

Keterangan:

P_t = Daya turbin (Watt)
 ρ = Massa jenis air (1000 kg/m³)
 h_{Net} = Head net (m)
 g = Percepatan gravitasi (9,8 m/s²)
 η = Efisiensi turbin (0,8)

b. Kecepatan turbin

Kecepatan turbin dapat dihitung menggunakan persamaan (15) [7].

$$N = 513,25 \frac{h_{Net}^{0,745}}{\sqrt{P_t}} \quad (15)$$

Kecepatan turbin spesifik dapat dihitung menggunakan persamaan (16) [7].

$$N_s = 575 \times \frac{P_t^{0,5}}{h_{Net}^{1,25}} \quad (16)$$

Keterangan:

N = Kecepatan putaran turbin (rpm)
 h_{Net} = Head net (m)
 P_t = Daya turbin air (Watt)
 N_s = Kecepatan putaran spesifik turbin (rpm)

2.5 Runner Turbin Crossflow

Runner turbin berfungsi untuk mengubah energi kinetic air menjadi energi mekanik.

a. Diameter luar runner

Untuk menentukan diameter luar runner dapat menggunakan persamaan (17) [7].

$$D_0 = 40 \frac{\sqrt{h_{Net}}}{N} \quad (17)$$

Keterangan:

D_0 = Diameter luar runner (m)
 h_{Net} = Head Net (m)
 N = Kecepatan putaran turbin (rpm)

b. Diameter dalam runner

Diameter dalam runner dapat dihitung menggunakan persamaan (18) [7].

$$D_1 = \frac{2}{3} \times D_0 \quad (18)$$

Keterangan:

D_1 = Diameter dalam runner (m)
 D_0 = Diameter luar runner (m)

c. Jarak antar sudu

Jarak antar sudu runner turbin dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (19) dan (20) [7].

$$s_1 = k \times D_0 \quad (19)$$

$$t = \frac{s_1}{\sin \beta_1} \quad (20)$$

Keterangan:

s_1 = Ketebalan sudu (cm)
 k = Konstanta (0,0087)
 D_0 = Diameter luar runner (cm)
 t = Jarak antar sudu pada turbin air (cm)
 β_1 = Sudut kecepatan air masuk

d. Lebar sudu runner turbin

Lebar sudu runner dapat dicari menggunakan persamaan (21) [7].

$$a = 0,17 \times D_0 \quad (21)$$

Keterangan:

a = Lebar sudu (cm)
 D_0 = Diameter luar runner (cm)

e. Jumlah sudu runner turbin

Jumlah sudu pada runner turbin dapat ditentukan menggunakan persamaan (22) [7].

$$n = \frac{\pi \times D_0}{t} \quad (22)$$

Keterangan:

n = Jumlah sudu pada turbin air
 D_0 = Diameter luar runner (cm)
 t = Jarak antar sudu pada turbin air (cm)

f. Panjang sudu runner turbin

Panjang sudu runner dapat dihitung menggunakan persamaan (23) [7].

$$L = \frac{Q \times N}{50 \times h_n} \quad (23)$$

Keterangan:

L = Panjang sudu (m)
 Q = Debit air (m³/s)
 N = Kecepatan putaran turbin (rpm)
 h_{Net} = Head Net (m)

g. Jari-jari kelengkungan sudu runner turbin

Jari-jari kelengkungan sudu pada runner turbin dapat dihitung menggunakan persamaan (24) [7].

$$r_c = 0,163 \times D_0 \quad (24)$$

Keterangan:

r_c = Jari-jari kelengkungan sudu
 D_0 = Diameter luar runner (cm)

h. Torsi Turbin

Menghitung torsi turbin dapat menggunakan persamaan (25) [7].

$$T = \frac{P_t}{2\pi \frac{N}{60}} \quad (25)$$

Keterangan:

T = Torsi (Nm)

P_t = Daya turbin (Watt)

N = Kecepatan putaran turbin (rpm)

2.6 Generator

Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik oleh putaran turbin. Secara umum generator dibagi menjadi dua jenis, yaitu generator sinkron dan generator asinkron. Pada umumnya, pembangkit listrik menggunakan generator sinkron sehingga akan menghasilkan *output* seperti daya, putaran, dan frekuensi yang konstan [8].

a. Kapasitas generator

Kapasitas generator yang dihasilkan menentukan kapasitas daya yang mampu dibangkitkan dalam sistem PLTMH. Untuk melakukan perhitungan daya sisi input generator dapat menggunakan persamaan (26) dan (27) [9].

$$P_{IN} = P_T \times \eta_{Transmisi} \quad (26)$$

$$P_G = \frac{P_{IN}}{\cos\phi} \quad (27)$$

Keterangan:

P_{IN} = Daya input sisi generator (kW)

P_T = Daya keluaran turbin (kW)

η_{Transmisi} = Efisiensi transmisi

b. Pulley dan belt

Pulley dan *belt* pada sistem mikro hidro berperan penting dalam mentransmisikan daya mekanis dari turbin ke generator. Transmisi mekanik antara turbin dan generator dapat dilakukan dengan kopel untuk kecepatan putaran yang sama, atau *pulley* dan *belt* untuk kecepatan putaran yang berbeda [10]. Perhitungan perbandingan diameter *pulley* turbin dan generator dapat menggunakan persamaan (28) [11]:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} \quad (28)$$

Keterangan:

n₁ = putaran turbin (rpm)

n₂ = putaran generator (rpm)

d₁ = Diameter *pulley* penggerak (cm)

d₂ = Diameter *pulley* yang digerakkan (cm)

c. Daya output generator

Perhitungan keluaran daya generator dapat menggunakan persamaan (29) [9].

$$P_{out} = P_{IN} \times \eta_G \quad (29)$$

Keterangan:

P_{out} = Daya keluaran generator (kW)

P_{in} = Daya input generator (kW)

η_G = Efisiensi generator

3. METODE PENELITIAN

Dalam pelaksanaan penelitian ini, prosedur yang harus dilakukan adalah sebagai berikut:

- Melakukan survei lokasi penelitian berupa observasi dan identifikasi secara langsung di sumber sungai Yeh Ha.
- Mengumpulkan data-data yang menunjang penelitian seperti ukuran *head* dan debit air Yeh Ha yang diperoleh dari hasil pengukuran langsung di lokasi, serta data observasi atau ilmiah yang mendukung perancangan PLTMH.
- Melakukan kajian teknik seperti menentukan kecepatan aliran air, debit air, dan tinggi *head*.
- Menentukan jenis turbin dan mendesain rancangan turbin yang akan digunakan pada PLTMH berdasarkan data *head* dan debit air, serta potensi sumber daya di lokasi.
- Memproyeksikan daya yang dihasilkan oleh PLTMH yang digunakan sebagai sumber energi listrik.
- Menarik kesimpulan dan saran dari hasil penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Parameter Perancangan PLTMH

4.2.1 Pengukuran Debit Air

Pengukuran dilakukan di lokasi penelitian tepatnya di hulu salah satu saluran sumber sungai Yeh Ha sebelum menuju sungai.

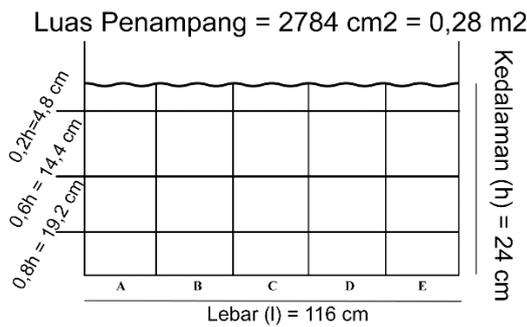
Pengukuran debit air dilakukan menggunakan alat ukur *flowatch*. Berikut adalah spesifikasi dari *flowatch* FL-03.

Tabel 1. Spesifikasi *Flowatch* FL-03

Kecepatan maksimum	150 km/jam
Sensitivitas minimum	< 3 km/jam - < 1m/s
Diameter	60 mm
Ketelitian	2FS
Suhu operasi	-50°-100°C

Berdasarkan dari SNI 3414:2019 “Tata cara pengukuran debit aliran sungai dan saluran terbuka menggunakan alat ukur arus dan pelampung” pengukuran debit dilakukan pada saluran sumber sungai dengan metode *velocity area* menggunakan *current meter* dengan cara merawas [12].

Pada pengukuran yang dilakukan terdapat lima titik pengukuran dengan masing-masing titik terdapat tiga kedalaman yang diukur dari atas permukaan air. Pembagian titik dihitung dengan cara membagi lima dari lebar penampang saluran, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pembagian *Section* pada Penampang Melintang Saluran Sumber Air Yeh Ha

Pengukuran dilakukan dengan mencelupkan *water impeller* selama 30 detik ke dalam aliran air. Kemudian menghitung debit air Yeh Ha menggunakan persamaan berikut:

$$Q = V \times A$$

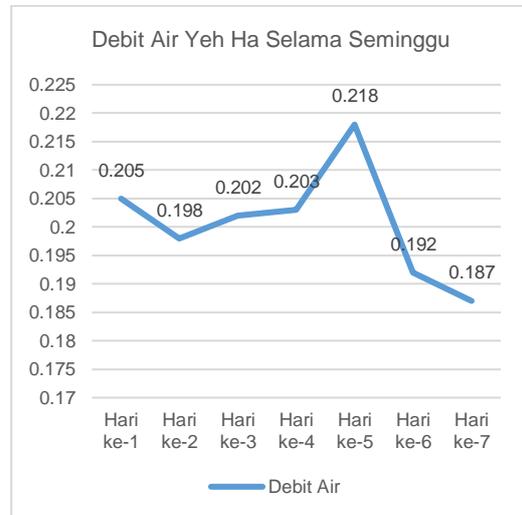
Berdasarkan dari perhitungan diperoleh bahwa luas penampang air Yeh Ha sebesar 0,28 m² dan menggunakan rumus rerata kecepatan aliran air adalah $V = 1/3 (V_{0,2h} + V_{0,6h} + V_{0,8h})$ maka didapatkan rerata besar debit air selama sehari ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Debit Air Sumber Sungai Yeh Ha Selama Sehari

Section	Kecepatan Aliran Air (m/s)			Kecepatan Aliran Air Rata-Rata (m/s)	Debit Air (m ³ /s)
	0,2h	0,6h	0,8h		
A	0,8	0,6	0,5	0,6	0,177
B	1,1	0,8	0,6	0,8	0,233

Section	Kecepatan Aliran Air (m/s)			Kecepatan Aliran Air Rata-Rata (m/s)	Debit Air (m ³ /s)
	0,2h	0,6h	0,8h		
C	1,1	0,7	0,6	0,8	0,224
D	1,0	0,7	0,5	0,7	0,205
E	0,8	0,7	0,5	0,7	0,187
DEBIT RATA-RATA					0,205

Besar debit air dari salah satu saluran sungai Yeh Ha selama satu minggu jika dilihat pada Gambar 2 terdapat perubahan yang signifikan. Dimana data yang didapatkan menjangkau hingga 0,2 m³/s. Jika dilakukan perhitungan rata-rata debit selama satu minggu dengan menjumlahkan seluruh debitnya dan hasilnya dibagi tujuh, maka diperoleh rata-rata debit air adalah 0,201 m³/s.



Gambar 2. Grafik Hasil Pengukuran Debit Air Yeh Ha Selama Seminggu

4.2.2 Pengukuran Tinggi Jatuh Air (Head)

Pengukuran *head* dilakukan dengan menggunakan aplikasi pada *smartphone*, yaitu *myaltitude*. Didapatkan bahwa ketinggian mdpl dari bak penenang adalah 337,2 mdpl dan di titik lokasi turbin hidro sebesar 332,63 mdpl. Sehingga didapatkan hasil pengukuran *head* adalah sebesar 4,57 m dan dibulatkan menjadi 4,6 m. Jika dibandingkan dengan pengukuran menggunakan alat ukur meteran didapatkan hasil yang tidak jauh berbeda dari aplikasi *myaltitude* yaitu sebesar 4,55 m.



Gambar 3. Hasil Pengukuran ketinggian mdpl dari Titik Bak Penenang ke Turbin Hidro Menggunakan Aplikasi Myaltitude.

4.2.3 Perhitungan Potensi Daya Hidrolik

Perhitungan potensi hidrolik sungai Yeh Ha dengan menggunakan data debit

dan *head* yang sudah terukur sebelumnya adalah sebagai berikut:

$$Ph = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,201 \text{ m}^3/\text{s} \times 4,6 \text{ m} = 9070,326 \text{ Watt}$$

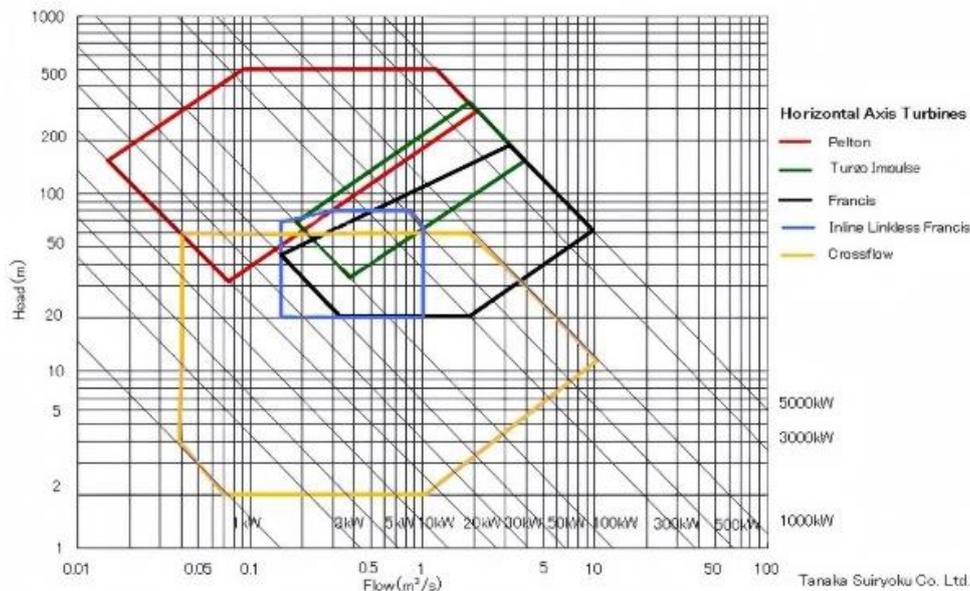
$$Ph = 9,07 \text{ kW}$$

4.2 Perancangan PLTMH

4.4.1 Pemilihan Jenis Turbin

Dalam menentukan jenis turbin PLTMH yang akan digunakan, data debit dan *head* dapat dicocokkan dengan menggunakan Tanaka Suiryoku Turbine Selection Chart [13]. Berdasarkan pada Gambar 4, turbin yang cocok digunakan dalam perancangan PLTMH Yeh Ha ini adalah turbin *crossflow*.

Tanaka Suiryoku Turbine Selection Chart



Gambar 4. Grafik Karakteristik Pemilihan Jenis Turbin Air (Odi & warto, 2020)

4.4.2 Perhitungan Pipa Pesat

Perhitungan diameter pipa pesat untuk PLTMH dengan menggunakan data hasil pengukuran debit desain yang telah dihitung (yaitu sebesar $0,201 \text{ m}^3/\text{s}$), dengan tinggi *head* 4,6 m. Diameter pipa pesat diperoleh sebagai berikut.

$$d = 0,72 \times Q^{0,5}$$

$$d = 0,72 \times 0,201^{0,5}$$

$$d = 0,3227 \text{ m} = 0,32 \text{ m}$$

Diameter pipa yang didapatkan adalah sebesar 0,32 m dan jari-jarinya (*r*) adalah 0,16 m. Berdasarkan hasil survei pemilihan jenis material yang cocok digunakan pada pipa *penstock* atau pipa pesat untuk PLTMH adalah material

berbahan *Mild Steel Galvanized* (baja berlapis). Berdasarkan standar ASTM A53, tegangan material pipa *mild steel galvanized* kelas A dengan ketebalan dinding 2,375 mm (dibulatkan 2mm) adalah 238 ton/m^3 [14]. Pemilihan material ini digunakan agar pipa dapat menahan tekanan tinggi yang terjadi pada *penstock* serta tahan terhadap suhu yang ekstrem.

Sesuai dengan kontur dan topografi di daerah aliran sungai, jumlah belokan pada lintasan *penstock* terdapat dua buah belokan. Untuk saluran *inlet penstock* terdapat *gate valve* atau katup sebagai pengontrol aliran air yaitu membuka dan menutup gerbang air.

Jarak antara bak penenang ke *power house* direncanakan berjarak 10 meter. Oleh karena itu, berdasarkan teori *Pythagoras* dan meng-*input* data tersebut maka diperoleh nilai panjang pipa pesat dan derajat kemiringannya sebagai berikut.

$$4,6^2 + 10^2 = c^2$$

$$\sqrt{121,16} = c$$

$$11,007 = c$$

$$c = 11 \text{ m}$$

Derajat kemiringannya dapat ditentukan pada persamaan berikut:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{a}{b} \right)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{4,6}{10} \right)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{a}{b} \right)$$

$$\alpha = 24,70^\circ = 25^\circ$$



Gambar 5. Ilustrasi Kemiringan *Head* PLTMH Yeh Ha

Setelah itu, ditentukan kecepatan aliran air dalam pipa pesat menggunakan perhitungan sebagai berikut:

$$v = \frac{4 \times 0,201}{3,14 \times 0,32^2}$$

$$v = \frac{0,804}{0,321536}$$

$$v = 2,5 \text{ m/s}$$

1. Perhitungan rugi-rugi pipa

- Rugi gesekan pada dinding pipa

$$h_{wall \text{ loss}} = \frac{0,04 \times 11 \times 0,08 \times 0,201^2}{0,32^5}$$

$$h_{wall \text{ loss}} = \frac{0,0014221152}{0,0033554432}$$

$$h_{wall \text{ loss}} = 0,424 \text{ m} = 0,42 \text{ m}$$

- Rugi turbulensi pada pipa

$$h_{turb \text{ loss}} = \frac{v^2}{2 \times g} (K_{frikasi})$$

$$h_{turb \text{ loss}} = \frac{2,5^2}{2 \times 9,81} (0,457)$$

$$h_{turb \text{ loss}} = \frac{6,25}{19,62} (0,457)$$

$$h_{turb \text{ loss}} = 0,318552 (0,457)$$

$$h_{turb \text{ loss}} = 0,145578 = 0,15 \text{ m}$$

- Rugi friksi pada pipa

$$h_{friction} = h_{wall \text{ loss}} + h_{turb \text{ loss}}$$

$$h_{friction} = 0,42 + 0,15$$

$$h_{friction} = 0,57 \text{ m}$$

2. Perhitungan *head* efektif

$$Head_{Net} = Head_{gross} - H_{friction}$$

$$Head_{Net} = 4,6 - 0,57$$

$$Head_{Net} = 4,03 \text{ m}$$

Persentase kehilangan *head* ditentukan dengan:

$$\%Losses = \frac{h_{friction}}{h_{gross}} \times 100\%$$

$$\%Losses = \frac{0,57}{4,6} \times 100\%$$

$$\%Losses = 0,124 \times 100\%$$

$$\%Losses = 12,4 \%$$

3. Menentukan *surge pressure*

$$a = \frac{1400}{\sqrt{1 + \left(\frac{2,1 \times 10^9 \times d}{E \times t} \right)}}$$

$$a = \frac{1400}{\sqrt{1 + \left(\frac{2,1 \times 10^9 \times 0,32}{200 \times 0,002} \right)}}$$

$$a = \frac{1400}{\sqrt{1 + \left(\frac{6,72 \times 10^8}{0,4} \right)}}$$

$$a = \frac{1400}{40987,80308}$$

$$a = 0,03415 = 0,034 \text{ m}$$

Menghitung nilai rugi pipa pesat:

$$h_{surge} = \frac{a \times v}{g}$$

$$h_{surge} = \frac{0,034 \times 2,5}{9,81}$$

$$h_{surge} = 0,00866 = 0,009 \text{ m}$$

4. Menghitung rugi-rugi total pipa

$$h_{total} = h_{gross} + h_{surge}$$

$$h_{total} = 4,6 + 0,009$$

$$h_{total} = 4,609 = 4,6 \text{ m}$$

5. Menentukan *safety factor*

$$SF = \frac{t \times s}{5 \times h_{total} \times 10^3 \times d}$$

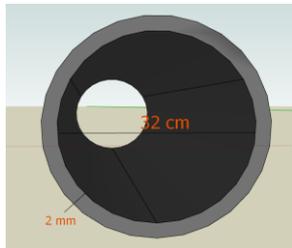
$$SF = \frac{0,002 \times 350000000}{5 \times 4,6 \times 10^3 \times 0,32}$$

$$SF = 0,95 = 1$$

Tabel 3. Uraian Perancangan *Penstock*

Uraian Perancangan <i>Penstock</i>	
Kecepatan aliran air dalam pipa	2,5 m/s

Uraian Perancangan Penstock	
Bahan Penstock	Mild Steel Galvanized (baja berlapis)
Panjang Penstock	11 m
Diameter Penstock	0,32 m
Tebal Penstock	0,002 m
$Head_{Net}$	4,06
Persentase kehilangan head akibat rugi-rugi	11,7%
Rugi-rugi total pada pipa	4,6 m
Safety Factor	1



Gambar 6. Desain Pipa Penstock Tampak Depan

Berdasarkan dari perhitungan pipa pesat yang didesain sesuai dengan debit air yang diukur yaitu 0,201 m³/s perlu diperhitungkan untuk saluran pembawa air menuju bak penenang dari sumber sungai Yeh Ha. Sebelumnya sudah terdapat pipa PVC di lokasi penelitian dengan diameter 5 inch atau setara dengan 12,7 cm. Namun, menggunakan pipa tersebut tidak dapat memenuhi aliran debit air sebesar 0,201 m³/s ke bak penenang sehingga membutuhkan pipa PVC tambahan untuk menyesuaikan debit desain untuk turbin tersebut. Ukuran diameter pipa pesat diperhitungkan sesuai dengan debit desain sebesar 32 cm, sehingga diperlukan jumlah pipa pembawa dengan perhitungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 v \times \pi \times r_{penstock} \times T_{penstock} &= n \times v \times \pi \times r_{pembawa} \times T_{pembawa} \\
 v \times \pi \times 16 \times 16 &= n \times v \times \pi \times 6,3 \times 6,3 \\
 16 \times 16 &= n \times 6,3 \times 6,3 \\
 256 &= 39,6n \\
 n &= 6,46 \approx 7 \text{ buah pipa}
 \end{aligned}$$

Jumlah pipa pembawa yang dibutuhkan adalah sebanyak 7 buah pipa tetapi karena telah tersedia satu buah pipa pembawa maka membutuhkan tambahan sebanyak 6 pipa PVC dengan ukuran yang

sama yaitu diameter 5 inch dan panjang 200 m.

4.4.3 Perhitungan Spesifikasi Turbin Air

Dengan mengasumsikan efisiensi turbin adalah 0,8 maka daya pada turbin *crossflow* dapat dihitung sebagai berikut.

1. Menghitung daya yang tersedia pada turbin

$$\begin{aligned}
 P_h &= 1000 \times 9,81 \times 0,201 \times 4,06 \\
 P_h &= 8005,5484 \text{ Watt} \\
 P_h &= 8,005 \text{ kW} = 8 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

2. Menghitung daya output turbin

$$\begin{aligned}
 P_t &= \rho \times g \times Q \times h_n \times \eta \\
 P_t &= P_h \times \eta
 \end{aligned}$$

Maka daya keluaran turbinnya adalah:

$$\begin{aligned}
 P_t &= 8005,5484 \times 0,8 \\
 P_t &= 6404,43872 \text{ Watt} \\
 P_t &= 6,404 \text{ kW} = 6,4 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

3. Menghitung kecepatan putaran turbin

$$\begin{aligned}
 N &= 513,25 \frac{4,03^{0,745}}{\sqrt{6,4}} \\
 N &= 513,25 \frac{2,825}{2,529} \\
 N &= 513,25 \times 1,12 = 574.84 = 575 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

Untuk menghitung kecepatan spesifik turbin dapat dicari sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 N_s &= 575 \times \frac{6,4^{0,5}}{4,06^{1,25}} \\
 N_s &= 575 \times \frac{2,529}{5,763} \\
 N_s &= 252,329 = 252 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

4.4.4 Karakteristik Turbin Air

1. Menghitung diameter luar runner turbin

$$\begin{aligned}
 D_0 &= 40 \frac{\sqrt{4,03}}{575} \\
 D_0 &= 40 \times 0,0035 = 0,14 \text{ m} = 14 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

2. Menghitung diameter dalam runner turbin

$$\begin{aligned}
 D_1 &= \frac{2}{3} \times 14 \\
 D_1 &= 9,3 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

3. Menghitung jarak antar sudu

Sudut β_1 dapat ditentukan dari kemiringan pipa pesat, yang dalam penelitian ini menggunakan kemiringan sebesar 25° .

Menentukan ketebalan sudu:

$$s_1 = 0,087 \times 14$$

$$s_1 = 1,2 \text{ cm}$$

Sehingga jarak antar sudu dapat dihitung sebagai berikut:

$$t = \frac{1,2}{\sin 25^\circ}$$

$$t = 2,84 \text{ cm} = 3 \text{ cm}$$

4. Menghitung lebar sudu runner turbin

$$a = 0,17 \times 14$$

$$a = 2,4 \text{ cm}$$

5. Menghitung jumlah sudu runner turbin

$$n = \frac{3,14 \times 14}{3}$$

$$n = 14,65 = 15 \text{ sudu}$$

6. Menghitung panjang sudu runner turbin

$$L = \frac{0,201 \times 575}{50 \times 4,03} = \frac{115,575}{201,5}$$

$$L = 0,574 \text{ m} = 0,57 \text{ m} = 57 \text{ cm}$$

7. Menghitung jari-jari kelengkungan sudu runner turbin

$$r_c = 0,163 \times 14$$

$$r_c = 2,3 \text{ cm}$$

8. Menghitung torsi turbin

$$T = \frac{6404,43872 \text{ Watt}}{2(3,14) \frac{575}{60}}$$

$$T = \frac{6404,43872}{60,183} = 106,42 \text{ Nm} = 106 \text{ Nm}$$

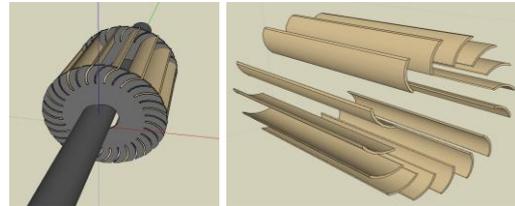
Tabel 4. Spesifikasi Turbin

Spesifikasi Turbin	
Kapasitas Turbin	8 kW
Daya Keluaran Turbin	6,4 kW
Efisiensi Turbin	80%
Kecepatan Putaran Turbin	575 rpm
Head Net	4,03 m
Debit Desain Aliran	0,201 m ³ /s
Torsi Turbin	106 Nm

Tabel 5. Karakteristik Runner Turbin

Karakteristik Runner Turbin	
Diameter Luar	14 cm

Diameter Dalam	9,3 cm
Jumlah Sudu	15 sudu
Jarak Antar Sudu	3 cm
Lebar Sudu	2,4 cm
Panjang Sudu	57 cm
Jari-jari Kelengkungan Sudu	2,3 cm



Gambar 7. Desain Runner Turbin dan Sudu Turbin Tampak Samping

4.4.5 Kapasitas Generator

Keluaran turbin adalah sebesar 6,4 kW dan untuk besar transmisi mekanik adalah 95%. Selanjutnya, untuk menghitung daya yang dapat dihasilkan pada sisi input generator dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_{IN} = P_T \times \eta_{Transmisi}$$

$$P_{IN} = 6,4 \text{ kW} \times 95 \%$$

$$P_{IN} = 6,08 \text{ kW} = 6 \text{ kW}$$

Sehingga berdasarkan dari potensi daya tersebut dapat dihitung kapasitas daya semu generatornya, yaitu: (dengan asumsi $\cos\phi = 0,8$)

$$P_G = \frac{6 \text{ kW}}{0,8} = 7,5 \text{ kVA}$$

4.4.6 Pemilihan Generator

Berdasarkan Berdasarkan dari data perhitungan turbin, diperoleh bahwa besar daya yang tersedia pada turbin adalah 8 kW. Oleh karena itu, dalam melakukan pemilihan jenis generator yang cocok untuk sistem PLTMH dengan kapasitas turbinnya adalah 8 kW maka jenis generator yang cocok adalah jenis generator sinkron. Dimana generator sinkron memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan generator asinkron [15].

Generator sinkron dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu generator sinkron 3 fasa dan 1 fasa. Tabel perbandingan spesifikasi dan karakteristik dari 3 jenis generator sinkron yang cocok untuk sistem PLTMH ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Spesifikasi dan Karakteristik dari 3 Jenis Generator Sinkron

Fitur	Generator sinkron 3	Generator sinkron 3	Generator sinkron 1 fasa
-------	---------------------	---------------------	--------------------------

	fasa rotor permanen	fasa rotor induksi	
Daya nominal	1 kW hingga 100 MW	1 kW hingga 1.000 MW	1 kW hingga 10 MW
Frekuensi operasi	50 Hz hingga 60 Hz	50 Hz hingga 60 Hz	50 Hz hingga 60 Hz
Tegangan operasi	110 V hingga 6.6 kV	110 V hingga 6.6 kV	110 V hingga 220 V
Kecepatan operasi	1.000 rpm hingga 3.000 rpm	1.000 rpm hingga 3.000 rpm	1.000 rpm hingga 3.000 rpm
Efisiensi	Tinggi	Rendah	Sedang
Berat	Ringan	Berat	Sedang
Ukuran	Kecil	Besar	Sedang

Generator sinkron 3 fasa rotor permanen cocok digunakan untuk aplikasi-aplikasi yang membutuhkan efisiensi yang tinggi, ukuran yang kecil, dan berat yang ringan. Selain itu, generator sinkron 3 fasa rotor permanen dapat digunakan untuk pembangkit listrik skala kecil, seperti PLTMH Yeh Ha.

Tabel 7. Perbandingan Pemilihan Generator Berdasarkan Tipenya

Merk	Daya Nominal	Kisaran Harga
Genset Hyundai	8 kW	≥Rp8.900.000
Sinar Mas	8 kW	≥Rp8.900.000
Genset WCT	10 kW	≥Rp9.900.000

Berdasarkan pada Tabel 7, terdapat tiga merk generator yang berbeda dengan memiliki spesifikasi yang sama; tegangan 220/380 V, frekuensi 50 Hz, kecepatan putaran 1500 rpm dan efisiensi 90%; berbeda harga. Pada penelitian ini, menggunakan generator dengan daya nominalnya 10 kW sebenarnya lebih cocok dengan kapasitas turbinnya 8 kW. Generator yang memiliki daya nominal yang sama dengan kapasitas turbin 8 kW sebenarnya cukup untuk memenuhi kebutuhan pompa air listrik. Selain itu, jika dianalisis dari segi biaya generator merk Sinar Mas dengan tipe SM-G3-8K lebih cocok digunakan untuk memenuhi kebutuhan pompa air Listrik yang kurang dari 8 kW.

4.4.7 Perencanaan Pulley dan Belt

Berdasarkan dari hasil perhitungan kecepatan putaran turbin PLTM Yeh Ha di atas adalah sebesar 575 rpm. Sedangkan kecepatan putaran generator yang digunakan sebesar 1500 rpm. Maka,

berdasarkan data tersebut dapat ditentukan rasionya sebagai berikut.

$$\frac{575}{1500} = \frac{d2}{d1}$$

$$\frac{575}{1500} = \frac{d2}{23}$$

$$\frac{575}{60} = \frac{d2}{d1}$$

Jadi berdasarkan perhitungan rasio diameter pulley di atas, didapatkan bahwa rasio pulley turbin dan generator adalah 60:23 dalam satuan cm. Selanjutnya menentukan nilai panjang belt dapat menggunakan persamaan di bawah.

$$L = 2C + \frac{\pi}{2}(d_p + D_p) + \frac{1}{4C}(d_p + D_p)$$

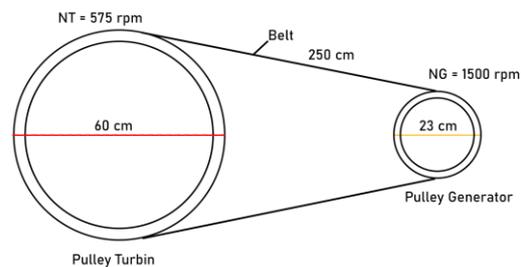
Jika asumsi jarak antar poros digunakan adalah sebesar 50 cm, maka diperoleh hasilnya sebagai berikut.

$$L = 2(50) + \frac{3,14}{2}(23 + 60) + \frac{1}{4(50)}(23 + 60)$$

$$L = 100 + 1,57(83) + 0,005(83)$$

$$L = 230,725 \text{ cm} = 230 \text{ cm} = 2300 \text{ mm}$$

Berdasarkan dari perhitungan panjang belt diperoleh ukuran 2300 mm, tetapi jika dipertimbangkan dengan ukuran belt yang tersedia secara komersial bahwa dengan panjang belt 2500 mm lebih baik digunakan karena ini mendekati hasil perhitungan di atas. Sehingga jarak antar poros disesuaikan kembali menggunakan persamaan sebelumnya dan diperoleh jarak antar poros yaitu 60 cm.



Gambar 8. Skema Pulley & Belt

4.4.8 Daya Keluaran Generator

Besarnya daya output generator menentukan seberapa banyak daya listrik yang dapat dihasilkan oleh PLTMH.

$$P_{out} = P_{IN} \times \eta_G$$

$$P_{out} = 6 \times 90\%$$

$$P_{out} = 6,6 \text{ kW} = 6 \text{ kW}$$

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan Pembahasan mengenai perancangan

PLTMH Yeh Ha maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Sungai Yeh Ha memiliki potensi sumber EBT sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro. Hasil pengukuran debit air didapatkan rata-rata selama seminggu adalah sebesar 0,201 m³/s dan potensi daya hidrolik adalah 9,07 kW.
2. Pemilihan jenis turbin yang cocok pada PLTMH Yeh Ha dilakukan berdasarkan grafik Tanaka Suiryoku *Turbine Selection Chart*. Data hasil pengukuran debit 0,201 m³ /s dan *head* 4,6 m menunjukkan bahwa jenis turbin *crossflow* memenuhi kriteria pada grafik pemilihan turbin. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh bahwa daya yang tersedia pada turbin adalah 8 kW.
3. Pemilihan jenis generator, dilakukan berdasarkan pada perbandingan jenis, spesifikasi, dan karakteristik generator. Jenis generator sinkron 3 fasa dengan rotor permanen digunakan pada PLTMH Yeh Ha dan menghasilkan daya sebesar 6 kW.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Peraturan Gubernur Bali Nomor 45 Tahun 2019., (2019) Peraturan Gubernur Bali Nomor 45 Tahun 2019 – JDIH Pemerintah Provinsi Bali [online]. [Diakses: 19 Mei 2023]. Tersedia di: <https://jdih.baliprov.go.id/produk-hukum/peraturan-perundang-undangan/pergub/24818>
- [2] Direktorat Jenderal EBTKE., (2020). Kementerian ESDM [online]. [Diakses: 19 Mei 2023]. Tersedia pada: <https://ebtke.esdm.go.id/post/2020/03/02/2491/menuju.bali.mandiri.energi.bersih>
- [3] Saputra, I. W. B., Weking, A. I., & Jasa, L., (2017). Rancang bangun pemodelan pembangkit listrik tenaga mikrohidro (pltmh) menggunakan kincir overshot wheel. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 16(2), 48.
- [4] BEKA, JICA., (2008). *Manual Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro*. IBEKA-JICA. Jakarta.
- [5] Schnitzer, V., (2009). *Micro Hydro Power Scout Guide*. Dutch-German Partnership Energising Development Access to Modern Energy Services - Ethiopia (AMES-E).
- [6] Arismunandar, Wiranto., (2004) *Penggerak Mula Turbin*. ITB. Bandung.
- [7] Layman's Guidebooks. On How To Develop a Small Hydro Site. *Journal Of Energy Saving*. Vol. 1, No. 4, pp 67- 150. 1998.
- [8] Suarda, M., (2009). *Kajian Teknis dan Ekonomis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro-Hidro di Bali*. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Volume 3, pp. 184-193.
- [9] Nugroho, D., Suprajitno, A., Gunawan., (2017). *Desain Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Air Terjun Kedung Kayang*. *Jurnal Rekayasa Elekrika*. Vol. 13, No. 3.
- [10] Kurniawan, A dkk., (2009). *Pedoman Studi Kelayakan Mekanikal Elektrikal*. Jakarta: Dirjen ESDM.
- [11] Prayuda, D.A., (2014). "Perencanaan Transmisi Sabuk V dan Pulley Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro" (skripsi).
Pikohidro di Laboratorium Konversi Energi, pp. 38-44. [online]. [Diakses 22 Mei 2023]. Tersedia pada: <http://dx.doi.org/10.29406/stek.v11i1.1943>
- [12] SNI 3414:2008, Tata cara pengambilan contoh muatan sedimen melayang di sungai dengan cara integrasi kedalaman berdasarkan pembagian debit.
- [13] Odi, F & Wardo., (2020). *Jurnal Suara Teknik. Kajian Analisis Efisiensi Turbin Dan Generator Simulator Pembangkit Listrik*
- [14] ASTM D2241-17. *Standards for Plastic Pipe and Fittings*. American

- Society for Testing and Materials,
West Conshohocken, PA, 2017.
- [15] Fitradhana, F., (2012).
Perbandingan Kinerja Generator
Sinkron dan Generator Asinkron.
Jurnal Teknik Elektro, 12(2), 121-
130.